

文章编号:1005-9865(2016)03-0047-08

水下桩腿长度变化对浮式结构固有频率的影响研究

武海浪,陈徐均,黄亚新,刘俊谊

(解放军理工大学 野战工程学院,江苏 南京 210007)

摘要:为了分析带支腿浮式结构水下桩腿处于不同的长度时振动固有频率的变化情况,采用有限元方法和三维线性水弹性理论对一理想的带支腿浮式结构进行研究,分工况计算了 3 种弹性模态的干、湿固有频率。结果表明对于同一阶弹性模态来说,结构主体平台振型是决定水动力系数大小的主要因素,桩腿水下长度是次要因素,而振型又受到桩腿长度的制约;桩腿水下长度的改变对带支腿浮式结构的干模态固有频率以及湿固有频率都有较明显地调制作用。对于干模态固有频率来说,桩腿关于船身越趋于对称分布时结构的共振频率越高;对于湿固有频率来说,水下桩腿长度地增加有迫使共振频率趋向低频方向移动趋势。

关键词:海洋工程;水弹性力学;带支腿浮式结构;固有频率;模态分析;桩腿长度

中图分类号:P751; U661.1 **文献标志码:**A **DOI:**10.16483/j.issn.1005-9865.2016.03.006

The modulation effects of the legs on the natural frequencies of the floating structure

WU Hailang, CHEN Xujun, HUANG Yaxin, LIU Junyi

(College of Field Engineering, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

Abstract: To analyze the dry and wet natural frequencies of the floating structure with legs, the hydrodynamic coefficients and the stiffness coefficients of the floating structure with legs are calculated by utilizing the Finite Element Method and the 3 D linear hydroelasticity theory. The results show the main factor that determines the hydrodynamic coefficients of the identical elastic mode is the mode shape of the main platform, and the length of the legs is the secondary factor, however, the mode shape of the main platform is restricted by the legs. The variation of the leg's length underwater can prominently modulate both the dry natural frequencies and the wetted natural frequencies of the floating structure with legs. In the dry condition, with the legs turning to the symmetrical distribution about the main body, the natural frequency of the structure tends to move to the high frequency domain. In the wet condition, the modulation effects of the legs on the natural frequencies are manifested by adjusting the added mass. With the legs stretching out from the bottom of the main body, the wetted frequencies have the tendency to move to the low frequency domain.

Keywords: ocean engineering; hydroelasticity; floating structure with legs; natural frequency; model analysis; length of the legs

带支腿浮式结构是指在浮式平台的基础上设计加装一定数量的可升降支腿而形成的新型工程结构。该工程结构通过升降装置的动作,平台主体或桩腿可垂直升降。如自升式石油钻井平台和自升(自航)式风电安装船就是典型的带支腿浮式结构。国内外学者对这种工程结构有较多的研究^[1-10],这些研究主要是针对该结构处于支承状态时所展开的。

带支腿浮式结构在放/提桩过程中,桩腿既未触及海底也未完全收起,结构始终处于漂浮状态,桩腿的存

收稿日期:2015-10-16

基金项目:国家自然科学基金(51379213);国家工信部高性能船舶科研项目(工信部联装[2012]533);国家科技支撑计划课题(2014bab16b05)

作者简介:武海浪(1983-),男,博士研究生,主要从事浮式工程结构流固耦合动力研究。E-mail:whlwzgrape@163.com

通讯作者:陈徐均。E-mail:chenxujun213@sina.com

在将导致浮式结构的水弹性性质与普通浮式结构不同。一方面,桩腿的收放会导致结构质量分布发生变化,这必然使结构同一种干模态的振型和固有频率也会发生变化;另一方面,水下桩腿的伸长或者缩短会使得船体的重心位置、转动惯量,湿面积等船体自身物理属性随时发生改变,这样流场中速度势的定解问题中的物面条件会发生改变导致其解会发生改变。最终会引起三维线性水弹性方程中的每一个参数发生相应地调整和变化。在这个过程中,带支腿浮式结构的湿固有频率必然会发生相应地调整。

固有频率是浮式结构重要的属性,一直受到关注。殷玉梅等^[11]推导了船舶上层建筑整体纵向振动固有频率预报公式,将上层建筑纵向振动固有频率视为由上层建筑根部刚性固定在船体上的剪弯振动固有频率和上层建筑根部弹性固定在主船体上的刚体回转振动固有频率两部分串联合成。为了使船舶在固有频率变化时也有好的减摇效果,金鸿章等^[12]研究了双水舱减摇系统。刘文玺等^[13]对系泊浮体的固有频率、各种工况下大幅非线性运动、缆索张力等进行了计算,并进行了对比研究。王显正等^[14]用一维梁有限元方法和三维有限元方法计算 3 艘实船总振动固有频率,对计算结果进行统计分析,提出对一维梁有限元方法计算结果地修正,该方法能有效改进一维梁有限元计算方法,可快速准确地预报船舶总振动固有频率。

桩腿在水下长度的改变而引起浮体湿固有频率变化的研究尚不多见^[15-17],这里采用有限元方法和线性三维水弹性理论对一理想化的带支腿浮式结构进行分析,计算了该浮式结构水下桩腿处于不同的长度时二节点垂弯振动、三节点垂弯振动、一节点扭转振动时固有频率,重点分析了引起浮式结构固有频率变化的机理和原因。

1 带支腿浮式结构固有频率分析原理

1.1 干固有频率计算

用有限元方法,任意形式结构的运动方程可表示为^[18]:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{P} \quad (1)$$

式中: \mathbf{M} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{K} 分别为浮体总质量矩阵、总阻尼矩阵和总刚度矩阵; \mathbf{U} 为节点位移向量; \mathbf{P} 为结构分布力。

忽略外部荷载以及阻尼得到系统的自由振动方程:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{U}} + \mathbf{K}\mathbf{U} = \mathbf{0} \quad (2)$$

假设式(2)中的自由振动为频率为 ω 的简谐振动,这样便得到:

$$(-\omega^2\mathbf{M} + \mathbf{K})\mathbf{D} = \mathbf{0} \quad (3)$$

若 \mathbf{M} 和 \mathbf{K} 是对称矩阵, \mathbf{M} 正定, \mathbf{K} 正定或者半正定,那么式(3)的特征值必将为非负实数。这些绝对值 ω_r^2 ($r = 1, 2, 3, \dots$)代表结构的固有频率,且有

$$0 \leq \omega_1^2 \leq \omega_2^2 \leq \dots \leq \omega_r^2 \quad (4)$$

每一个特征值都有一个特征向量与之相对应 \mathbf{D}_r ,代表第 r 阶模态:

$$\mathbf{D}_r = \{\mathbf{D}_{r1}, \mathbf{D}_{r2}, \dots, \mathbf{D}_{rj}, \dots, \mathbf{D}_{rn}\}^T \quad (5)$$

1.2 湿固有频率计算

假定船体结构周围的流体为理想、不可压缩流体,波浪振幅值为小量,可得自由状态下浮体的线性水弹性方程^[19]:

$$(\mathbf{a} + \mathbf{A})\ddot{\mathbf{p}} + (\mathbf{b} + \mathbf{B})\dot{\mathbf{p}} + (\mathbf{c} + \mathbf{C})\mathbf{p} = \mathbf{F} + \bar{\mathbf{R}} + \mathbf{\Delta} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{p} = \{p_1(t), p_2(t), \dots, p_m(t)\}$ 为广义主坐标列阵; $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ 分别为浮体结构的广义质量、广义阻尼和广义刚度矩阵; $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ 分别为流体广义附加质量、广义附加阻尼和广义流体恢复力系数矩阵; $\mathbf{F}, \bar{\mathbf{R}}, \mathbf{\Delta}$ 分别为广义波浪激励力、广义静态力和广义集中力列阵。

若令广义辐射力有如下表达式:

$$E_r = \rho \iint_{\bar{S}} \mathbf{n} \cdot \mathbf{u}_r \cdot i\omega \sum_{k=1}^m p_k(t) \phi_k dS \cdot e^{i\omega t} \quad (7)$$

式中: \mathbf{n} 是物体湿表面上的单位法向量; \mathbf{u}_r 为该点第 r 阶位移振型; $\phi_k(x, y, z)$ 表示辐射波速度势的空间分量,它表示当浮体在平衡位置附近以入射波圆频率 ω ,以第 k 阶干模态振型作单位主坐标幅值振荡时所诱导

的流场周围的流体运动速度势; p_k 表示结构动力学控制方程中的主坐标响应复数幅值; ρ 为流体密度; i 是虚数单位。这样,广义辐射力可以表示为:

$$E_r = \sum_{k=1}^m p_k T_{rk} e^{i\omega t} \quad (8)$$

式中: T_{rk} 表示浮体以频率 ω 、第 k 阶模态作单位幅值的简谐运动时,浮体所受到的第 r 阶辐射力。它可以表示为:

$$T_{rk} = \omega^2 A_{rk} - i\omega B_{rk} \quad (9)$$

其中,

$$A_{rk} = \frac{\rho}{\omega^2} \operatorname{Re} \iint_S n \cdot u_r \cdot i\omega \phi_k dS \quad (10)$$

$$B_{rk} = \frac{\rho}{\omega} \operatorname{Im} \iint_S n \cdot u_r \cdot i\omega \phi_k dS \quad (11)$$

式中: $\operatorname{Re}, \operatorname{Im}$ 分别表示取复数的实部和虚部,系数 A_{rk} 与加速度同相位, B_{rk} 与速度同相位,所以它们分别称为附加质量和附加阻尼系数。

恢复力系数的表达式:

$$R_r = - \sum_{k=1}^m p_k C_{rk} e^{i\omega t} \quad (12)$$

$$C_{rk} = -\rho \iint_S n \cdot u_r \cdot g w_k dS \quad (13)$$

式中: C_{rk} 表示广义恢复力系数。当 $r \leq 6$ 以及 $k \leq 6$ 时,上式即退化为刚体运动的恢复力系数矩阵,其余情况则为弹性变形模态和刚体运动的耦合交叉项。

当带支腿浮式结构处于波浪中,对于其垂荡、横摇、纵摇以及每一阶弹性模态,当其作给定频率 ω 的运动时都对应有其本身的湿固有频率 ω_{wr} ,该频率可由如下特征方程求解:

$$-\omega_{wr}^2 [a_{rr} + A_{rr}(\omega)] + (c_{rr} + C_{rr}) = 0 \quad (14)$$

其中, a_{rr} 和 c_{rr} 为结构广义质量矩阵和广义刚度矩阵对角元素; $A_{rr}(\omega)$ 为浮体以频率 ω 作振荡运动的附加质量矩阵对角元素; C_{rr} 为静水恢复力矩阵对角元素。

2 带支腿浮式结构特性分析

2.1 有限元建模及工况划分

将船身简化为水平三维梁是水弹性分析的常用方法^[20-26]。文中将主体平台简化为水平梁的组合,同时,将船身上携带的桩腿简化为垂直三维梁。为了将桩腿合理的加装到主体平台上,具体方法及相关参数:选取某型带支腿浮式结构为研究对象,结构长度约为130 m,宽38 m,型深8 m。6个升降腿分布于全船两侧,每个桩腿高68 m,截面为4 m×4 m方形。如图1,将船身简化为水平梁组合,采用有限元分析软件建模。将代表主体平台的梁单元放置于水平面之上,若不考虑桩腿的存在,主体平台重心始终位于静水面上,平衡坐标系的原点位置。

按桩腿长度对所建立的模型分为5种工况,如表1所示。将工况5设定为工况1的对称形式,其上部桩腿的长度恰好为工况1上部桩腿的长度,而工况5下部桩腿的长度为工况1上部桩腿的长度,这样重心的位置就与工况1的重心位置关于静水面相对称。而转动惯量和工况1的情况完全一致。工况2和工况4也是一组对称工况,工况3独立于工况1、5和工况2、4自成一类。

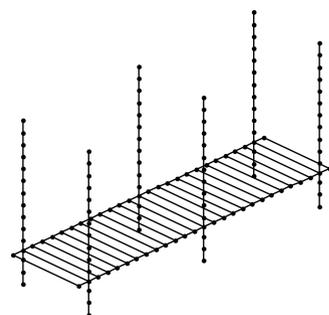


图1 梁单元带支腿浮式结构

Fig. 1 The floating structure with legs formed by beam

表 1 带支腿浮式结构工况设置

Tab. 1 The set of the cases

项目	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
垂直梁底部到水平梁中心距离/m	14	24	34	44	54
垂直梁顶部到水平梁中心距离/m	54	44	34	24	14
重心与静水面相对位置/m	2.88	1.44	0	-1.44	-2.88

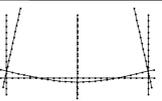
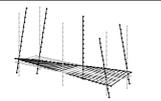
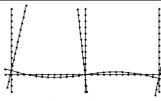
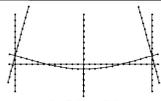
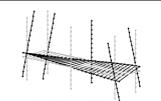
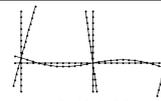
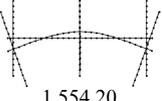
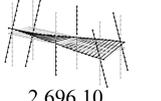
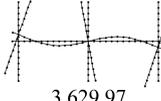
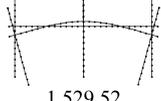
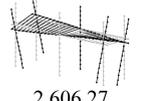
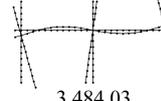
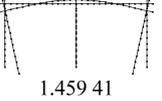
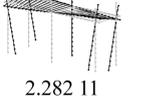
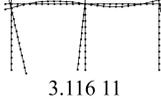
算例只是一个理想的带支腿浮式结构,实际带支腿浮式结构的配重分布未必能满足上述要求。但本文着重于带支腿浮式结构湿固有频率变化的机理解释,故选择了这样的一种建模方法来进行分析。按照上面两两一组的划分工况好处在于,当进行干模态分析的时候,由于工况相对称,真空中带支腿浮式结构的相同的模态,其振型和固有频率必定一致。当对两种结果相同的干模态结果放到波浪中进行水弹性分析时,由于同一组中的两种工况的水下桩腿长度是不一样的,可能会导致结果的差异。对比这种差异性结果就可以有针对性的分析桩腿对带支腿浮式结构湿固有频率的影响。增强了结果的的可对比性,有利于对水弹性理论中湿固有频率计算机制的认识。

2.2 模态分析

主要考察桩腿的存在对主体平台振型和频率的影响,暂时不考虑桩腿本身振动而产生的弹性模态,故认为桩腿的刚度远远大于船身刚度。分别提取了带支腿浮式结构三种振动:二节点垂直弯曲;三节点垂直弯曲;一节点扭转振动。如表 2 所示,分别给出了桩腿处于 5 种工况下的振型和固有频率。

表 2 带支腿浮式结构干模态振型及固有频率

Tab. 2 The mode shape and natural frequencies of the floating structure with legs

工况	模态振型固有频率/Hz			工况	模态振型固有频率/Hz		
	二节点垂弯	一节点扭转	三节点垂弯		二节点垂弯	一节点扭转	三节点垂弯
1	 1.459 41	 2.382 11	 3.116 11	2	 1.529 52	 2.606 27	 3.484 03
3	 1.554 20	 2.696 10	 3.629 97	4	 1.529 52	 2.606 27	 3.484 03
5	 1.459 41	 2.282 11	 3.116 11				

在一个模态振型下,当桩腿向下伸长,由工况 1 转为工况 5,浮式结构干模态固有频率有先增大后减小的趋势。如在二节点垂弯时,工况 1 的固有频率为 1.459 41 Hz,工况 2 时为 1.529 52 Hz,到工况 3 时固有频率最大,为 1.554 20 Hz,工况 4 时为 1.529 52 Hz,工况 5 为 1.459 41 Hz。三节点垂弯和一节点扭转振动也有类似的规律,这表明桩腿的存在对带支腿浮式结构的垂弯振动固有频率确实存在着影响,且桩腿越是关于主体平台对称分布,上述三种振动的固有频率就会越大,这反应了桩腿对带支腿浮式结构干模态固有频率地调制作用。

工况 1 和工况 5,工况 2 和工况 4 的垂弯模态振型是相互对称的,固有频率相一致,振型的幅度也是一致的。这样将工况 1、工况 2 和工况 3 的垂弯归一化振型提出来,放在一张图中进行对比,如图 2 所示,每一幅图中都有三种工况的带支腿浮式结构的振型。

对于二节点垂弯,如图 2(a),对比三种工况主体平台振型可知,工况 3 主体平台的垂弯程度明显比工况 2 和工况 1 的振幅更大,工况 1 的垂弯振幅为这三种振型中最小的工况。可见二节点垂弯振动中,桩腿越是趋于对称,不仅固有频率越大,而且主体平台的归一化振幅也越大。同样的规律也存在于一节点扭转振动和三节点垂弯振动当中,如图 2(b)和图 2(c)所示。

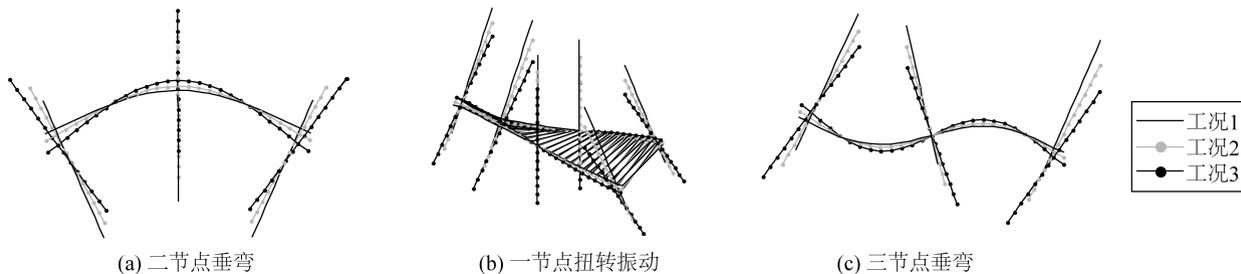


图2 模态振型对比图

Fig. 2 Comparison of the mode shapes

3 水动力建模及结果分析

3.1 湿面网格划分

已有的三维线性水弹性计算程序采用了单对称复合势的方法对水动力参数进行求解。如果所研究的浮式结构是关于 x 或者 y 轴的对称结构,那么只需要定义一半湿面单元即可。

对带支腿浮式结构 5 种工况下的湿面进行了网格划分,如图 3 所示。将静水面作为湿面元划分的起算点,由于桩腿的升降而带来的水线面的改变在此被忽略。因此,平衡坐标系中零刻度线以下的面积均被认为是浮式结构的湿面。结构主体平台的型深为 8 m,定吃水为 4 m,为型深的一半,与上部分面积形成对称。

5 种工况中,带支腿浮式结构的主体船身上湿面单元的划分是相同的,共有面元 540 个,各种工况之间,湿面的主要差距体现在桩腿上。工况 1 有 648 个面元。以此类推,工况 2 时结构上共划分了 744 个面元;工况 3 为 840 个面元;工况 4 为 936 个面元;工况 5 为 1 032 个面元。图 3 给出了工况 1 和工况 5 的面元划分示意图。



图3 各种工况湿面元划分

Fig. 3 The set of the wetted panels

3.2 水动力系数分析

利用三维线性水弹性理论,通过数值方法,可求得带支腿浮式全梁式结构在波浪中运动的附加质量和附加阻尼,即水动力系数。这里重点讨论二节点垂弯、一节点扭振和三节点垂弯这几个模态的湿固有频率,因此,图 4 至图 6 给出了这三个运动模态的水动力系数对角线元素随无因次频率的关系曲线。图中横坐标与纵坐标所代表的物量均进行了无量纲化处理。 A 为附加质量, B 为附加阻尼, ρ 为流体密度, L 为结构长度, Vol 为浮式结构排水体积, g 为重力加速度, ω 为圆频率。

对于二节点垂弯来说,如图 4(a),工况 3 所代表的曲线高于其余几种工况,而其余工况的水动力系数也没有按照水下桩腿的长短进行排列。这和刚体模态的特性表现出了差异^[15]。刚体模态的分析中,通常是工况 5 所获得的附加质量最大,附加质量与水下桩腿长度有很好的正相关性。而此时,桩腿最长的工况 5 所获得的附加质量还略低于水下桩腿长度远低于它的工况 4。由图 4(b)也可知,工况 3 的附加阻尼系数峰值是所有工况中最大。出现以上现象的原因在于,尽管工况 3 在五种工况中可积分的湿表面不是最大的,但经过对比可知,桩腿处于工况 3 时,带支腿浮式结构主体平台的归一化振型的振幅最大,桩腿的湿表面积和主体平台湿表面相比较是一个小量。因此,水动力系数计算公式中,主体平台的模态振型这一项就成为了影响水动力系数大小的主要因素,而桩腿长度变化导致的湿表面称为次要因素,因此二节点垂弯模态中工况 3 的附加质量和附加阻尼系数最大。而工况 1 和工况 5 主体平台归一化振型的振幅最小,因此,在二节点垂弯水动力系数的计算中,这一组值相对来说偏低。

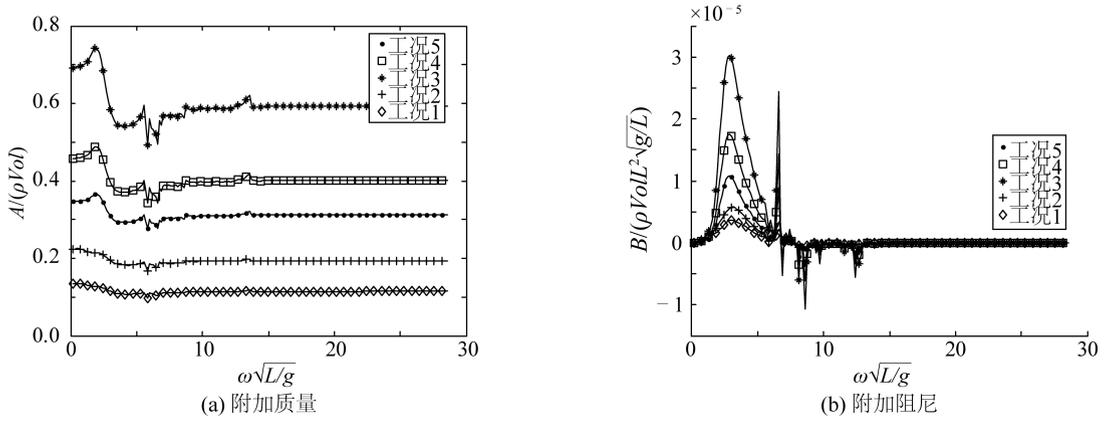


图 4 二节点垂弯水动力系数

Fig. 4 Hydrodynamic coefficients of 2-node VB

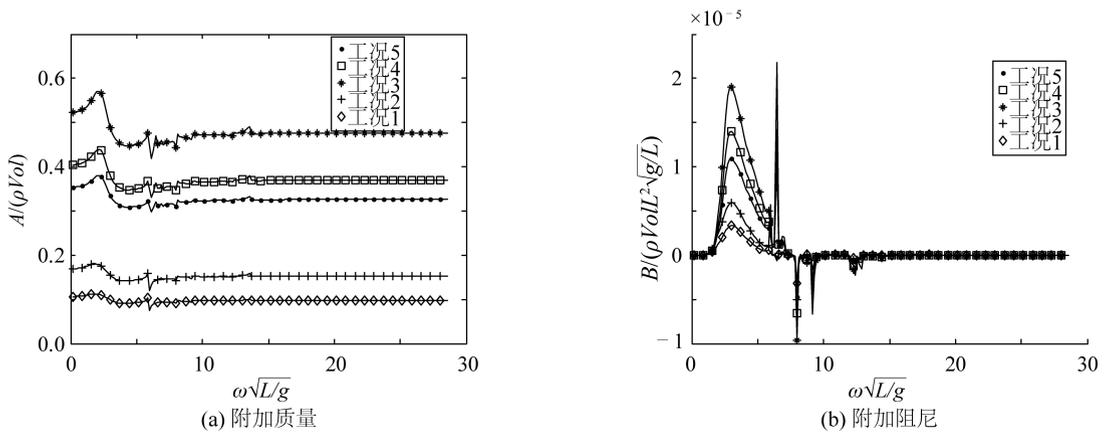


图 5 一节点扭转振动水动力系数

Fig. 5 Hydrodynamic coefficients of 1-node torsion

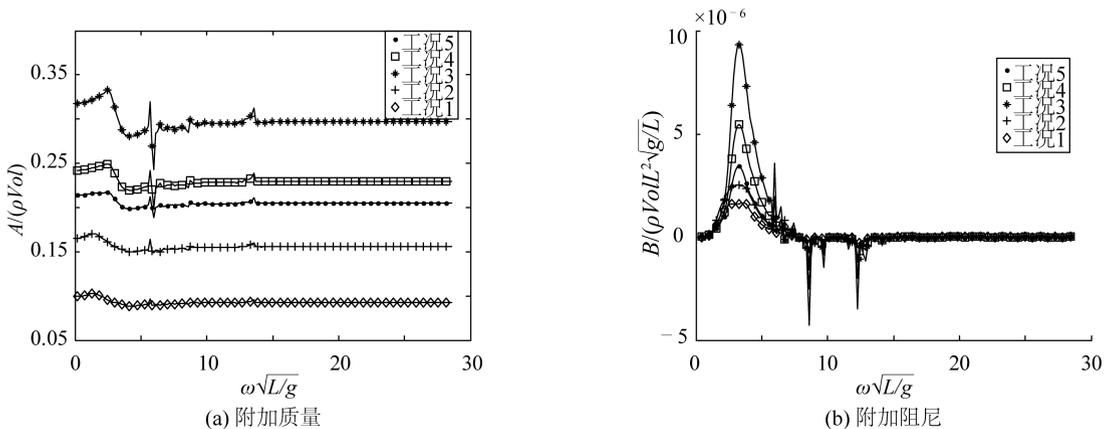


图 6 三节点垂弯水动力系数

Fig. 6 Hydrodynamic coefficients of 3-node VB

同时,尽管工况 1 和工况 5 主体平台的模态振型相一致,但对比工况 1 和工况 5 的附加质量发现,前者要低于后者。原因在于,工况 1 和工况 5 主体平台的模态振型相同后,积分面积就成了水动力系数积分当中的主要因素,工况 1 水下的桩腿短于工况 5,附加质量系数自然略低于工况 5 的情况。因此当振型一致时,桩腿水下长短又成了影响水动力系数的主要因素。工况 2 和工况 4 的附加质量关系同样可以用上述原理进行解释。一节点扭转振动和三节点垂弯振动也有相类似的规律。

从上述分析可以看出,工况不同时,主体平台的模态振型是主要因素,当主体平台振型一致时,桩腿在水下的长度上升为影响水动力系数的主要因素。这体现出对称分析法在带支腿浮式结构分析中的优势,即在

对称与非对称,相等与不相等中分清带支腿浮式结构水弹性分析中的主要因素和次要因素。按同样的方法对下面的模态进行分析。

3.3 湿固有频率分析

前面已经分析了带支腿浮式结构各个工况的附加质量、静水恢复力和刚度矩阵,按式(6)可以计算出结构不同工况下各阶模态的湿固有频率,表3给出了湿固有频率的计算结果。

表3 各工况湿固有频率
Tab. 3 The wet resonant frequencies of the cases (rad/s)

运动模态	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5
二节点垂弯	5.507 0	5.496 9	5.349 5	5.047 8	4.597 6
一节点扭转振动	7.193 9	7.140 3	6.847 1	6.326 8	5.662 4
三节点垂弯	12.024 9	12.071 5	11.440 1	10.179 2	8.642 7

对于带支腿浮式结构的对于弹性体模态,同一种振动模态,桩腿长度不同,湿固有频率也不一样。这三种振动的湿固有频率随水下桩腿长度的增加均呈现出减小的趋势,如表3所示,当带支腿浮式结构处于工况1时,其二节点垂弯湿固有频率为5.507 0 rad/s;工况2时为5.496 9 rad/s;工况3时为5.349 5 rad/s;工况4时为5.047 8 rad/s;工况5时为4.597 6 rad/s。

这些数据都表明,和带支腿浮式结构干模态固有频率一样,桩腿同样对带支腿浮式结构的湿固有频率具有明显地调制作用,但这种调制作用的表现形式和调制的机理却各不相同。对于干模态固有频率来说,桩腿关于船身越趋于对称分布时结构的振动固有频率越高,桩腿的调整使得结构的质量分布发生了变化,使得固有频率发生变化;对于湿固有频率来说,水下桩腿长度地增加引起结构附加质量的非线性调整。从综合效果看,有迫使共振频率趋向低频方向移动趋势。

4 结 语

采用有限元法和线性三维水弹性理论对一理想化的带支腿浮式结构进行分析,计算了该浮式结构水下桩腿处于不同长度时各种模态的固有频率,重点分析了引起结构固有频率变化的机理和原因。

前人的研究结果认为对于带支腿浮式结构刚体模态来说,水动力系数大小主要取决于桩腿水下长度,其水下桩腿长度越大,水动力相对系数越大。本文研究表明,对于弹性模态来说,主体平台振幅、水下桩腿长度和水动力系数三者之间成为一种耦合关系。结构主体平台振幅是决定水动力系数大小的主要因素,桩腿处于对称分布时,主体平台的振幅最大,水动力系数相对最大,同一种振型下,工况3的附加质量可以是工况1的2~3倍。桩腿长度成为了次要因素,只有当振幅相同时,水下桩腿长度越长,水动力系数才越大,此时,工况5的附加质量可约为工况1的2倍,但同时振幅的大小又受到桩腿长度的制约。

对于干模态固有频率来说,桩腿关于船身越趋于对称分布,结构的共振频率向高频移动。对于湿固有频率来说,水下桩腿长度的增加引起结构附加质量的非线性调整,从综合效果看,则有迫使共振频率趋向低频方向移动趋势。由于桩腿的存在,带支撑腿浮式结构形成了具有一定宽度的共振频域区间。二节点垂弯振动的共振频域区间相对较窄,而一节点扭转振动和三节点垂弯的共振频域区间则相对较宽。

参考文献:

- [1] HOWARTH M, DIER A, JONES W, et al. Jack-up response to wave-in-deck loads during extreme storms [J]. Marine Structures, 2004, 17(3-4): 275-290.
- [2] TAN X M, LI J, LU C. Structural behaviour prediction for jack-up units during jacking operations [J]. Computers & Structures, 2003, 81(24-25): 2409-2416.
- [3] CASSIDY M J, TAYLOR P H, EATOCK T R, et al. Evaluation of long-term extreme response statistics of jack-up platforms [J]. Ocean Engineering, 2002, 29(13): 1603-1631.
- [4] JENSEN J J, CAPUL J. Extreme response predictions for jack-up units in second order stochastic waves by FORM [J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 2006, 21(4): 330-337.
- [5] BIENEN B, QIU G, TIM P. CPT correlation developed from numerical analysis to predict jack-up foundation penetration into

- sand overlying clay [J]. *Ocean Engineering*, 2015, (108): 216-226.
- [6] KOHAN O, BIENEN B, GUADIN C, et al. The effect of water jetting on spudcan extraction from deep embedment in soft clay [J]. *Ocean Engineering*, 2015, (97): 90-99.
- [7] 张浦阳, 于晓洋, 丁红岩. 海上自升式钻井平台插桩阶段桩靴承载力计算[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(5): 613-619. (ZHANG P Y, YU X Y, DING H Y. Spudcan bearing capacity of the offshore jack-up drilling platform during the preloading process [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(5): 613-619. (in Chinese))
- [8] 郑喜耀, 周松望, 姚首龙. 自升式钻井平台插桩分析的几个关键问题 [J]. *海洋通报*, 2014, 33(1): 84-89. (ZHENG X Y, ZHOU S W, YAO S L. Key issue for jack-up rig leg penetration analysis [J]. *Marine Science Bulletin*, 2014, 33(1): 84-89. (in Chinese))
- [9] ZHANG A X, DUAN M L, LI H M. Prediction methods of spudcan penetration for jack-up units [J]. *China Ocean Engineering*, 2012, 26(4): 591-602.
- [10] LI H T, YANG Q X, LI Y. Study on general performance of jack-up under elevated condition [J]. *China Ocean Engineering*, 2009, 23(3): 577-584.
- [11] 殷玉梅, 赵德有. 船舶上层建筑整体纵向振动固有频率预报方法研究[J]. *船舶力学*, 2011, 15(5): 538-544. (YIN Y M, ZHAO D Y. Study on predicting method of natural frequency for superstructure's overall longitudinal vibration [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2011, 15(5): 538-544. (in Chinese))
- [12] 金鸿章, 张宏瀚, 贲成华. 船舶双水舱减摇系统设计与仿真研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2008, 29(3): 242-250. (JIN H Z, ZHANG H H, BEN C H. An improve dual anti-rolling system for ships [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2008, 29(3): 242-250. (in Chinese))
- [13] 刘文玺, 周其斗, 张纬康, 等. 浮体与系泊系统的耦合动力分析[J]. *船舶力学*, 2014, 18(8): 940-957. (LIU W X, ZHOU Q D, ZHANG W K, et al. Dynamic analysis of the coupled floating body/mooring system [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2014, 18(8): 940-957. (in Chinese))
- [14] 王显正, 赵德有, 孙超, 等. 船舶总振动固有频率使用算法[J]. *中国舰船研究*, 2007, 2(1): 56-58. (WANG X Z, ZHAO D Y, SUN C, et al. Improved algorithm for the natural frequencies of ship vibration [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2007, 2(1): 56-58. (in Chinese))
- [15] 陈徐均, 武海浪, 黄亚新. 水下桩腿长度对带支腿浮式结构水动力系数的影响分析[J]. *水动力学研究与进展*, 2014, 29(1): 83-92. (CHEN X J, WU H L, HUANG Y X. The effect of the underwater leg length on hydrodynamic coefficients of the floating structure with legs [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2014, 29(1): 83-92. (in Chinese))
- [16] 黄亚新, 武海浪, 陈徐均. 带支腿浮式结构水动力建模及波浪力分析[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2014, 35(9): 1067-1075. (HUANG Y X, WU H L, CHEN X J. The analysis of the modeling and wave excitation force on the floating structure with legs [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2014, 35(9): 1067-1075. (in Chinese))
- [17] WU H L, CHEN X J, HUANG Y X, et al. Influence of the legs underwater on the hydrodynamic response of the multi-leg floating structure[J]. *Ships and Offshore Structures*, 2014, 9(6): 578-595.
- [18] 邱吉宝, 向树红, 张正平. 计算结构动力学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009: 137-139. (QIU J B, XIANG S H, ZHANG Z P. *Computational structure dynamics* [M]. Hefei: Press of USTC, 2009: 137-139. (in Chinese))
- [19] WU Y S. Hydroelasticity of floating boddies [D]. Ph.D. Thesis, Brunel Univ., U.K., 1984.
- [20] DANIELE D, ELENA C. Slamming clustering on fast ships: From impact dynamics to global response analysis [J]. *Ocean Engineering*, 2013(62): 110-122.
- [21] CHEN X J, WU Y S, CUI W C, et al. Nonlinear Hydroelastic analysis of a moored floating body [J]. *Ocean Engineering*, 2003(30): 965-1003.
- [22] 陈占阳, 任慧龙, 李辉. 水弹性理论与分段模型试验在船体振动响应分析中的应用 [J]. *振动与冲击*, 2012, 31(24): 119-124. (CHEN Z Y, REN H L, LI H. Application of hydroelasticity theory and segmented model test in hull vibration response analysis [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(24): 119-124. (in Chinese))
- [23] CHEN Z Y, REN H L, LIU H, et al. Experimental and numerical analysis of bow slamming and whipping in different sea states [J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2012, 16(3): 246-252.
- [24] SENJANOVIC I, MALENICA S, TOMASEVIC S. Investigation of ship hydroelasticity [J]. *Ocean Engineering*, 2008, 36(5-6): 523-535.
- [25] SENJANOVIC I, MALENICA S, TOMASEVIC S. Hydroelasticity of large container ships [J]. *Marine Structures*, 2009, 22(2): 287-314.
- [26] SENJANOVIC I, TOMIC M, TOMASEVIC S. An explicit formulation for restoring stiffness and its performance in ship hydroelasticity [J]. *Ocean Engineering*, 2008, 35(13): 1322-1338.